

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Свищева Дениса Алексеевича

«Термодинамический анализ и исследование механизма слоевой обращенной газификации биомассы», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность работы определяется необходимостью роста использования в России местных энергоресурсов для обеспечения нужд локальных потребителей тепло- и электроэнергии. Таким ресурсом, прежде всего, является древесная биомасса. Одним из эффективных и экологически чистых способов ее утилизации является газификация. В отличие от хорошо изученных технологий прямого сжигания газификация является более сложным процессом, до сих пор требующим глубоких исследований. Поэтому тема диссертационной работы и представленные в ней результаты термодинамического анализа и экспериментальных исследований механизма обращенной газификации биомассы представляются актуальными.

Цель и сильные стороны работы

Целью диссертационной работы является оценка предельных значений показателей эффективности процесса конверсии, таких как химический КПД процесса и степень конверсии топлива, а также поиск физико-химических ограничений, препятствующих их достижению. В диссертационном исследовании решались следующие целевые задачи:

- разработка метода термодинамической оптимизации и анализа режимных параметров газогенераторного процесса;
- создание работающего на древесной биомассе лабораторного стенда с реактором обращенного типа и постановка ряда экспериментов на нем;
- анализ экспериментальных режимов и верификация метода оптимизации с использованием полученных опытных данных.

При анализе процессов газификации традиционно рассматривается влияние одного-двух режимных параметров при постоянных остальных. Такой подход позволяет произвести оптимизацию процесса только для узкой области параметров. В работе предложен новый подход, позволяющий осуществить

анализ и оптимизацию экспериментальных режимов на множестве равновесных состояний. Следует отметить большой объем экспериментальных исследований, проведенных на трех лабораторных установках. Полученные экспериментальные результаты сами по себе представляют значительную научную ценность. Исследование механизма слоевой газификации имеет важное теоретическое значение. Сведения о механизме конверсии являются базовыми и существенными для его математического моделирования, анализа, объяснения экспериментальных закономерностей.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- * предложен новый метод анализа и оптимизации экспериментальных режимов на множестве равновесных состояний, который позволяет обобщенно рассматривать влияние различных факторов на процесс конверсии.
- * раскрыты новые закономерности протекания термохимического процесса, обусловленные законами равновесной термодинамики. Обобщены и систематизированы физико-химические ограничения, препятствующие оптимизации процесса газификации.
- * выдвинута и обоснована гипотеза о механизме слоевой конверсии древесного топлива в реакторе обращенного типа.

Степень обоснованности научных положений. Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах.

Достоверность основных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректной постановкой задач, использованием апробированных методик экспериментов и расчетов, а также сравнением результатов численного анализа с экспериментальными и расчётными данными, в том числе, представленными в литературных источниках.

Практическое значение диссертационной работы заключается в том, что представления о различных механизмах конверсии могут стать основой прикладных НИОКР, направленных на создание нового высокоэффективного энергетического оборудования. Прикладное значение имеет экспериментальная методика, используемая для исследования конверсии одиночных частиц, а также методика

составления полного материального и энергетического баланса процесса.

Апробация работы

Материалы, отражающие содержание диссертационной работы, представлены в 25 печатных работах, в том числе 9 статей в журнале из перечня ВАК и 15 статьях в журналах, входящих в реферативные базы данных WoS и Scopus. Материалы работы докладывались на 8 конференциях. Публикации в должной мере отражают содержание работы.

Структура, объём и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка использованной литературы. Работа содержит 132 страницы текста, 16 таблиц, 27 рисунков. Список литературы содержит 216 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, разработанность в России и мире, сформулированы цель исследования, обоснована научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору технологий газификации и подходов к их термодинамическому моделированию. Дана краткая характеристика основных технологий газификации биомассы, приведены барьеры коммерциализации технологий газификации, показано влияние свойств топлива и режимных параметров на процесс газификации. Значительная часть главы посвящена проблемам термодинамической оптимизации параметров газификации и методам анализа и оптимизации режимов газификации на множестве равновесных состояний. На основе обзора предложены направления исследований.

Во **второй главе** дано описание лабораторного стенда мощностью 8,5 кВт с обращенным реактором без горловины. Дано обоснование и подробное описание методик проведения экспериментов и обработки результатов. Представлены подходы к определению материального и энергетического балансов процесса газификации в установке. Дано обоснование разработанной термодинамической модели процесса. Верификация модели выполнена по данным моделирования паровоздушной газификации углерода, полученные с помощью закона действующих масс.

В **третьей главе** приведены результаты исследования и дан их анализ. Термодинамический анализ экспериментальных режимов выявил три ограничения эффективности. Показано, что первое ограничение связано с

кинетику взаимодействия газа и топлива и проявляется при недостаточном времени их реагирования (недостаточной высоте слоя топлива). Второе ограничение эффективности свойственно автотермическим процессам, которым может не хватать собственного тепла. Третье ограничение эффективности возникает, когда превращение энергии системы в энергию газа сдерживается стехиометрическими факторами. При этом тепло, подведенное извне, преимущественно расходуется на нагрев веществ и стенок реактора. Оказалось, что в ряде случаев процессы газификации биомассы оказались нетипичными и отличными от литературных данных. Сформулирована гипотеза о механизме газификации биомассы. По этому механизму, отдельные стадии процесса протекают не в различных зонах слоя топлива, а в пределах отдельных частиц.

В **четвертой** главе излагаются методы и результаты исследований, направленных на проверку и уточнение гипотезы о нестратифицированном механизме газификации. Даны результаты исследования на кварцевом обращенном лабораторном газификаторе. При малой мощности реактора и медленном движении в нем топливной массы, установлено формирование в слое отдельной зоны пиролиза. Увеличение мощности реактора приводило к исчезновению данной зоны. Автор считает, что подобные изменения обусловлены интенсивностью теплообменных процессов между горячим ядром горения и поступающим в него рабочим топливом. В результате проявляется малая чувствительность состава генераторного газа к изменению расхода воздуха.

В **пятой** главе представлены результаты исследования конверсии индивидуальных частиц биомассы, целью которых являлось воспроизведение процесса газификации частиц древесины в прифурменном пространстве обращенного газогенератора. Приведено описание лабораторной установки и методики исследования. Дано описание механизмов горения одиночных частиц древесины в зависимости от скорости дутья. Указывается, что проведенные эксперименты частично подтверждают гипотезу о нестратифицированном механизме обращенной газификации. Показано, что существуют условия, при которых уменьшается в размерах и исчезает одна из реакционных зон слоя.

В **выводах** сформулированы основные результаты работы.

Содержание автореферата в сжатом виде полностью отражает основное содержание диссертации.

Соответствие тематики и содержания работы выбранной специальности

Тема диссертации, результаты исследований соответствуют паспорту научной специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», а именно п. 3. «Исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии».

Замечания и вопросы по диссертации

1. В тексте диссертационной работы имеется ряд неточностей, например: на стр. 29 указывается, что реакторах с кипящим слоем повышается химический недожог вследствие уноса - должно быть речь идет о механическом недожоге. На стр. 47 вводится термин «глобальный максимум эффективности процесса», далее он не упоминается и не понятно что он означает. Автор часто использует слово «уголь», правильно было бы говорить о коксе биомассы. На рис. 16 сердцевина древесины названа инертной, инертной может быть зола, а никак не часть биомассы.
2. Автор рассматривает влияние тепловых потерь, в особенности в реакционной зоне. Вместе с тем, эти потери определены косвенно. Было бы целесообразно оценить их напрямую с использованием термометрии поверхности. Следует отметить, что относительные тепловые потери оказывают влияние на изменение температуры в реакторе малого диаметра, но не будут столь существенно влиять на процессы в реальных аппаратах.
3. Объяснение снижения теплоты сгорания генераторного газа и эффективности газификации при уменьшении расхода воздуха ростом теплотерь из-за увеличения высоты слоя понятно. Теплотери могут влиять на состав генераторного газа через температуру процесса. Однако, данных по изменению температур по высоте слоя и по сечению в разных зонах подтверждающих это предположение в работе не представлено.
4. Обращает на себя внимание, что результаты опытов в стальном и кварцевом реакторе демонстрируют противоположный характер изменения содержания CO и H₂ в диапазоне скорости движения слоя 0,7 – 1,5 м/с (рис. 21) при этом для стального реактора меняется отношение H₂/CO, а для кварцевого остается практически постоянным (0.68-0.72). Это нуждается в объяснении.
5. Заключение о малой чувствительности состава генераторного газа к изменению расхода воздуха в зоне высоких скоростей движения слоя, на мой взгляд, должно быть подтверждено опытами на кварцевом реакторе в связи с тем, что кварцевый и стальной реактор демонстрируют разные тенденции в зоне скоростей движения слоя. Данные, приведённые в таблице 11, наглядно свидетельствуют о снижении

доли метана и CO₂ с ростом расхода воздуха в кварцевом реакторе, что логично объяснить в первую очередь увеличением температуры процесса.

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень работы. Она является законченной научно-квалификационной работой, посвящённой решению важной задачи

Заключение

Диссертация Свищева Д. А. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решается научная задача, имеющая важное хозяйственное значение. Самостоятельно полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (п.9). Диссертация обладает внутренним единством. Основные идеи работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. Автор работы, Свищев Денис Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией
специальных котлов отделения
парогенераторов и топочных
устройств, д.т.н. старший научный сотрудник

Рябов Георгий Александрович

«13» мая 2019 г.

Почтовый адрес:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового
Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО
«ВТИ»), 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14, Тел.: 8 (495) 1377770;

E-mail: vti@vti.ru Сайт: <http://vti.ru>

Подпись Рябова Г.А. удостоверяю:

